

## TITLE OF THE INVENTION

非破壊検査用渦電流センサ (EDDY-CURRENT SENSOR FOR NONDESTRUCTIVE TESTING)

## BACKGROUND OF THE INVENTION

### Field of the Invention

本発明は、非破壊で物体の形状や欠陥などを検知する非破壊検査用渦電流センサに関する。

### Description of the Related Art

渦電流探傷検査 (Eddy-Current Testing) 技術は、原子力発電設備や航空機などの重要金属機械部品の非破壊検査に多く用いられている。このような渦電流を利用した非破壊検査用のECTプローブは、一般に、励磁コイルとこの励磁コイルから与えられる交番磁界によって誘起される渦電流に基づく磁界を検知するための検出コイルとから主として構成される。例えば、特開平7-83884号公報、特開平9-189682号公報、特開平11-248685号公報、又は特開2002-90490号公報はこのような技術を開示している。

また、本願の一部発明者は、例えば、宮越貴久、ダリウス・カスプラザック、山田外史、岩原正吉、「ECT技術によるプリント配線の欠陥検出の可能性」、日本応用磁気学会誌、V o l . 23, N o . 4-2、第1613頁～第1616頁、1999年、及び山田外史、岩原正吉、「プレーナ形マイクロウズ電流プローブによる探傷技術の動向」、日本応用磁気学会誌、V o l . 23, N o . 7、第1817頁～第1825頁、1999年において、プリント基板検査用のECTプローブとして、ミアンダ形励磁コイルと渦電流検知用の8の字形検出コイルとからなるECTプローブを提案している。

上述したごとき従来のECTプローブは、渦電流に基づいて発生する磁界を検出するための手段としてコイルを使用しているため、その寸法の小型化及び感度の向上には限界があった。即ち、検出コイルは、ある程度の長さ、幅及び厚さを有しており、従って、従来のECTプローブはミリ単位以上の比較的大きな欠陥や変化に対してのみ、実用的に検知可能であった。

しかしながら、最近では、物体の表面における微細欠陥の有無の検査やプリント基板の微細化パターンの検査など、非常に精細な検査にECTプローブを使用する要望が大きくなっている。

このような要求に従来の構造のECTプローブで対応しようとすると、以下のような問題が生じる。即ち、

(1) 分解能を上げるために、検出コイルの巻き数、コイル径、長さなどを小さくしようとしても物理的限界がある、

(2) コイルの感度はコイルの断面積及び巻き数に比例するため、分解能を上げるためにコイルの巻き数やコイル径、長さを小さくすると感度が低下してしまう、

(3) 感度が低下すると、信号対ノイズ (S N) 比が低下するため、信号自体の信頼性が低下してしまう。

特に、励磁コイルより被検査体側に突出部が形成されないように、検出コイルを励磁コ

イルの被検査体とは反対側に設けようとした場合、検出コイルの感度をさらに高めない信頼性の高い検査を期待することができない。

#### BRIEF SUMMARY OF THE INVENTION

従って本発明の目的は、非常に高い感度及び非常に高い分解能の両方を具備した非破壊検査用渦電流センサを提供することにある。

本発明の他の目的は、高速で応答可能な非破壊検査用渦電流センサを提供することにある。

本発明によれば、検査時に互いに逆方向の励磁電流が流れる互いに平行な1対の電流線路を少なくとも有しており非破壊検査すべき被検査体に印加される交流磁界を励磁電流によって発生する平坦形状の励磁コイルと、1対の電流線路間の中心軸線上であって、励磁コイルの被検査体とは反対側の位置に設けられており、交流磁界により発生した渦電流によって被検査体から新たに生じる磁界を検出するための少なくとも1つの磁気抵抗効果(MR)素子とを備えた非破壊検査用渦電流センサが提供される。

渦電流変化によって生じる磁界を検出する手段としてMR素子を用いているため、被検査体側に突出部が存在しないように励磁コイルの被検査体とは反対側の位置にこのMR素子を設置した場合にも、非常に高い感度で渦電流方向の微小変化のみを検出することができる。しかも、検出手段を大幅に小型化できるため、検知分解能も非常に高めることが可能となる。さらにまた、素子の磁気モーメントが小さくかつ磁気応答性が良好であるため、励磁周波数を高めることができるので、高速のスキャンが可能となり、分解能を上げたときの検査速度の低下を防止することができる。従って、高感度、高速かつ高分解能であり、SN比が高く高信頼性を有する非破壊検査を行なうことができる。

少なくとも1つのMR素子が、少なくとも1つの例えばスピンバルブ磁気抵抗効果(SVMR)素子などの巨大磁気抵抗効果(GMR)素子又は少なくとも1つのトンネル磁気抵抗効果(TMR)素子であることが好ましい。

少なくとも1つのGMR素子又は少なくとも1つのTMR素子の各々が、励磁コイルの平坦面と平行に積層された多層膜を備えていることが好ましい。

この多層膜が磁化固定層(ピンド層)を含んでおり、このピンド層の磁化方向が1対の電流線路と平行に設定されていることがより好ましい。

多層膜が磁化自由層(フリー層)を含んでおり、外部磁界が存在しない際のこのフリー層の磁化方向が1対の電流線路と垂直に設定されていることが非常に好ましい。

少なくとも1つのMR素子が、チップ基板とチップ基板上に形成された単一のMR体と、単一のMR体の両端部に接続された1対の電極端子とを各々が有する少なくとも1つの薄膜チップからなり、少なくとも1つの薄膜チップが励磁コイル上に固着されていることが好ましい。

少なくとも1つのMR素子が、1対の電流線路間の中心軸線上に配列された単一の又は複数のMR素子からなることも好ましい。

少なくとも1つのMR素子が、チップ基板とチップ基板上に形成された複数のMR体と、複数のMR体の両端部にそれぞれ接続された複数対の電極端子とを各々が有する少なくとも1つの薄膜チップからなり、少なくとも1つの薄膜チップが励磁コイル上に固着されて

いることも好ましい。

この場合、少なくとも1つの薄膜チップが、1対の電流線路間の中心軸線上に配列され励磁コイル上に固着されている単一の又は複数の薄膜チップからなることが好ましい。

励磁コイルが、ミアンダ形コイルであることも好ましい。

励磁コイルが、基板上に形成されたコイル導体層とこのコイル導体層を覆う絶縁層とを備えてなることも好ましい。

本発明の他の目的及び効果は、添付図面で説明される本発明の好ましい実施態様に関する以下の記載から明らかとなるであろう。

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE SEVERAL VIEWS OF THE DRAWINGS

図1は、本発明の好ましい実施形態における非破壊検査用渦電流センサの構成を概略的に示す斜視図である；

図2は、図1のA-A線断面図である；

図3は、図1の実施形態における各薄膜チップの構成を概略的に示す斜視図である；

図4a及び4bは、図3のGMR素子を例えば構成するSVMR素子の主要部における2つの膜構成例を概略的に示す斜視図である；

図5a及び5bは、図1の実施形態における非破壊検査用渦電流センサを用いて行なうプリント基板の配線チェックの原理を説明するための平面図である；

図6a及び6bは、図5a及び5bにおけるプリント基板の配線路の部分のみを拡大して示した平面図である；

図7は、本発明の他の実施形態における非破壊検査用渦電流センサの構成を概略的に示す斜視図である；そして

図8は、図1又は7の実施形態における薄膜チップの構成の変更態様を概略的に示す斜視図である。

#### DETAILED DESCRIPTION OF THE INVENTION

図1は本発明の好ましい実施形態における非破壊検査用渦電流センサの構成を概略的に示す斜視図であり、図2は図1のA-A線断面図である。

これらの図において、10は絶縁材料によって形成された基板、11は基板10上に折り返しを有する平面パターンとして形成されたコイル導体からなるミアンダ形の励磁コイル、12及び13は基板10上に形成されており、励磁コイル11の両端に電氣的に接続されている1対の電極端子、14～18は励磁コイル11上に固着されており、各々が例えばSVMR素子などのGMR素子を搭載している薄膜チップをそれぞれ示している。

励磁コイル11は、図2から明らかのように、絶縁性の基板10上に形成されたコイル導体層20と、このコイル導体層20を覆う絶縁層21とを含んでいる。励磁コイル11の励磁部は、基板10のZ方向に互いに平行に伸長し両端部で折り返している複数の電流線路を有している。隣り合う電流線路には、検査時に、互いに逆方向の交番励磁電流が流れる。

薄膜チップ14～18は、励磁コイル11のX方向で中央部に位置する1対の電流線路11a及び11bの中心軸線上に一直列状態で配列されている。基板10の図1において見

える側の面と反対側の面が被検査体に対向する面であり、従って、薄膜チップ14～18は、励磁コイル11の被検査体とは反対側の面上に固着されている。

図3は本実施形態における各薄膜チップの構成を概略的に示す斜視図である。なお、図3においては、理解を容易にするため、GMR素子が誇張して大きく描かれている。

薄膜チップ14～18の各々は、チップ基板30上に、例えばSVMR素子などのGMR素子31と、そのGMR素子31に電氣的に接続された1対のリード導体32及び33と、リード導体32及び33にそれぞれ電氣的に接続された1対の電極端子34及び35とを薄膜技術によって形成したものである。

図4a及び4bはGMR素子31を例えば構成するSVMR素子の主要部における2つの膜構成例を概略的に示す斜視図である。

図4aに示す膜構成例において、SVMR素子の主要部は、基板側から強磁性材料によるフリー層40、非磁性導電材料によるスペーサ層41、強磁性材料によるピンド層42及び反強磁性材料によるピンニング層43を順次積層してなるSVMR多層膜から構成されている。このSVMR多層膜において、ピンド層42及びピンニング層43の磁化方向は、層の面内方向の-Z方向であり、外部磁界が存在しないときのフリー層40の磁化方向は層の面内方向の+X方向である。

図4bに示す膜構成例において、SVMR素子の主要部は、基板側から反強磁性材料によるピンニング層43'、強磁性材料によるピンド層42'、非磁性導電材料によるスペーサ層41'及び強磁性材料によるフリー層40'を順次積層してなるSVMR多層膜から構成されている。このSVMR多層膜において、ピンド層42'及びピンニング層43'の磁化方向は、層の面内方向の-Z方向であり、外部磁界が存在しないときのフリー層40'の磁化方向は層の面内方向の+X方向である。

このような多層膜構成を有するSVMR素子は、層に垂直なY方向の磁界成分に対しては感度が低く、層に水平なX方向及びZ方向の磁界成分に対して高い感度を有している。特に、Z方向の磁界成分に対しては非常に高い検出感度を有している。

図3からも分かるように、GMR素子31は、その各層が1対の電流線路11a及び11bの面内（励磁コイルの平坦面）方向（X及びZ方向）と平行となるように設定されている。特に、本実施形態では、ピンド層42又は42'の磁化方向が1対の電流線路11a及び11bの伸長方向（Z方向）と平行となり、外部磁界が存在しないときのフリー層40又は40'の磁化方向がこれら1対の電流線路11a及び11bの伸長方向と垂直でありかつその線路の面内（励磁コイルの平坦面）方向となるように（X方向に）設定されている。

図5a及び5bは本実施形態における非破壊検査用渦電流センサを用いて行なうプリント基板の配線チェックの原理を説明するための平面図であり、図6a及び6bはプリント基板の配線路の部分のみを拡大して示した平面図である。

配線チェックを行なう場合、非破壊検査用渦電流センサを、その励磁コイル11に高周波電流を流しながら、被検査体であるプリント基板と面平行に2次元スキニングする。その状態で、GMR素子にセンス電流を流して出力を検出する。

今、図5a及び5bに示すように、プリント基板上の配線路50と非破壊検査用渦電流センサの電流線路とが互いに平行でありかつ電流線路11a及び11bの間に配線路50

が位置している状態を考える。図5 a及び図6 aは配線路5 0に断線がない場合、図5 b及び図6 bは断線がある場合である。

図5 aに示すように、励磁コイル1 1を流れる高周波の励磁電流5 1により、配線5 0には、渦電流5 2がその線路方向に沿って誘起される。この状態は、図6 aにも表されている。図5 aに示すように、この渦電流5 2によって新たに磁界（渦電流誘起磁界）5 3が誘起され、GMR素子はこの磁界5 3のX方向成分に応じた電圧を出力する。

配線路5 0に断線5 4が存在すると、渦電流5 2は、図5 b及び図6 bに示すように、その断線5 4の手前で折り返し、その結果、この折り返す渦電流5 2の分だけ渦電流が余分に流れることとなり、断線の部分の渦電流誘起磁界が変化する。GMR素子はこの変化した渦電流誘起磁界のX方向成分に応じた電圧を出力する。

本実施形態によれば、渦電流変化によって生じる磁界を検出する手段として、GMR素子をそれぞれ備えた複数の薄膜チップ1 4～1 8を用いているため、被検査体側に突出部が存在しないように励磁コイル1 1の被検査体とは反対側の位置にこのこれら薄膜チップを設置した場合にも、非常に高い感度で渦電流方向の微小変化のみを検出することができる。しかも、検出手段を大幅に小型化できるため、検知分解能も非常に高めることが可能となる。さらにまた、GMR素子は、磁気モーメントが小さくかつ磁気応答性が良好であるため、励磁周波数を高めることができるので、高速のスキャンが可能となり、分解能を上げたときの検査速度の低下を防止することができる。従って、高感度、高速かつ高分解能であり、SN比が高く高信頼性を有する非破壊検査を行なうことができる。

図7は本発明の他の実施形態における非破壊検査用渦電流センサの構成を概略的に示す斜視図である。

同図において、7 0は絶縁材料によって形成された基板、7 1は基板7 0上に折り返しを有する平面パターンとして形成されたコイル導体からなるミアンダ形の励磁コイル、7 2及び7 3は基板7 0上に形成されており、励磁コイル7 1の両端に電氣的に接続されている1対の電極端子、7 4は励磁コイル7 1上に固着されており、例えばSVMR素子などのGMR素子を搭載している薄膜チップをそれぞれ示している。

励磁コイル7 1は、図1の実施形態の場合と同様に、絶縁性の基板7 0上に形成されたコイル導体層と、このコイル導体層を覆う絶縁層とを含んでいる。励磁コイル7 1の励磁部は、基板7 0のZ方向に互いに平行に伸長し両端部で折り返している複数の電流線路を有している。隣り合う電流線路には、検査時に、互いに逆方向の交番励磁電流が流れる。

薄膜チップ7 4は、励磁コイル7 1のX方向で中央部に位置する1対の電流線路7 1 a及び7 1 bの中心軸線上に配置されている。基板7 0の図7において見える側の面と反対側の面が被検査体に対向する面であり、従って、薄膜チップ7 4は、励磁コイル7 1の被検査体とは反対側の面上に固着されている。

以上の説明から明らかなように、図7の実施形態は、薄膜チップが複数ではなく単一であることを除いて、図1の実施形態とほぼ同様の構成を有するものである。従って、本実施形態の作用効果などの説明は省略する。

図8は図1又は7の実施形態における薄膜チップの構成の変更態様を概略的に示す斜視図である。なお、図8においては、理解を容易にするため、GMR素子が誇張して大きく描かれている。

この変更態様において、薄膜チップは、チップ基板80上に、例えばSVMR素子などの4つのGMR素子81～84と、これらGMR素子81～84にそれぞれ電氣的に接続された4対のリード導体85及び86、87及び88、89及び90並びに91及び92と、これらリード導体にそれぞれ電氣的に接続された4対の電極端子93及び94、95及び96、97及び98並びに99及び100とを薄膜技術によって形成したものである。

GMR素子81～84の各々の一例であるSVMR素子の主要部における膜構成は、図4a及び4bに示したものと同様である。即ち、SVMR素子の主要部は、基板側から強磁性材料によるフリー層40、非磁性導電材料によるスペーサ層41、強磁性材料によるピンド層42及び反強磁性材料によるピンニング層43を順次積層してなるSVMR多層膜から構成されているか、又は基板側から反強磁性材料によるピンニング層43'、強磁性材料によるピンド層42'、非磁性導電材料によるスペーサ層41'及び強磁性材料によるフリー層40'を順次積層してなるSVMR多層膜から構成されている。このSVMR多層膜において、ピンド層42又は42'及びピンニング層43又は43'の磁化方向は、層の面内方向の-Z方向であり、外部磁界が存在しないときのフリー層40又は40'の磁化方向は層の面内方向の+X方向である。

このような多層膜構成を有するSVMR素子は、層に垂直なY方向の磁界成分に対しては感度が低く、層に水平なX方向及びZ方向の磁界成分に対して高い感度を有している。特に、Z方向の磁界成分に対しては非常に高い検出感度を有している。

図8からも分かるように、GMR素子81～84の各々は、その各層が1対の電流線路11a及び11b(71a及び71b)の面内(励磁コイルの平坦面)方向(X及びZ方向)と平行となるように設定されている。特に、本実施形態では、ピンド層42又は42'の磁化方向が1対の電流線路11a及び11b(71a及び71b)の伸長方向(Z方向)と平行となり、外部磁界が存在しないときのフリー層40又は40'の磁化方向がこれら1対の電流線路11a及び11b(71a及び71b)の伸長方向と垂直でありかつその線路の面内(励磁コイルの平坦面)方向となるように(X方向に)設定されている。

なお、上述の実施形態は、薄膜チップがSVMR素子などのGMR素子を備えている場合について述べたが、薄膜チップが、GMR素子に代えて、さらに高感度のTMR素子を備えていても良いことは明らかである。

本発明による非破壊検査用渦電流センサは、原子力発電設備や航空機などの重要金属機械部品の非破壊検査のみならず、物体の表面及び内面における微細欠陥の有無の検査やプリント基板の微細化パターンの検査など、非常に精細な非破壊検査に極めて有用である。

以上述べた実施形態は全て本発明を例示的に示すものであって限定的に示すものではなく、本発明は他の種々の変形態様及び変更態様で実施することができる。従って本発明の範囲は特許請求の範囲及びその均等範囲によってのみ規定されるものである。